



Dr. Krich
U⁻
→ bld, Archiv

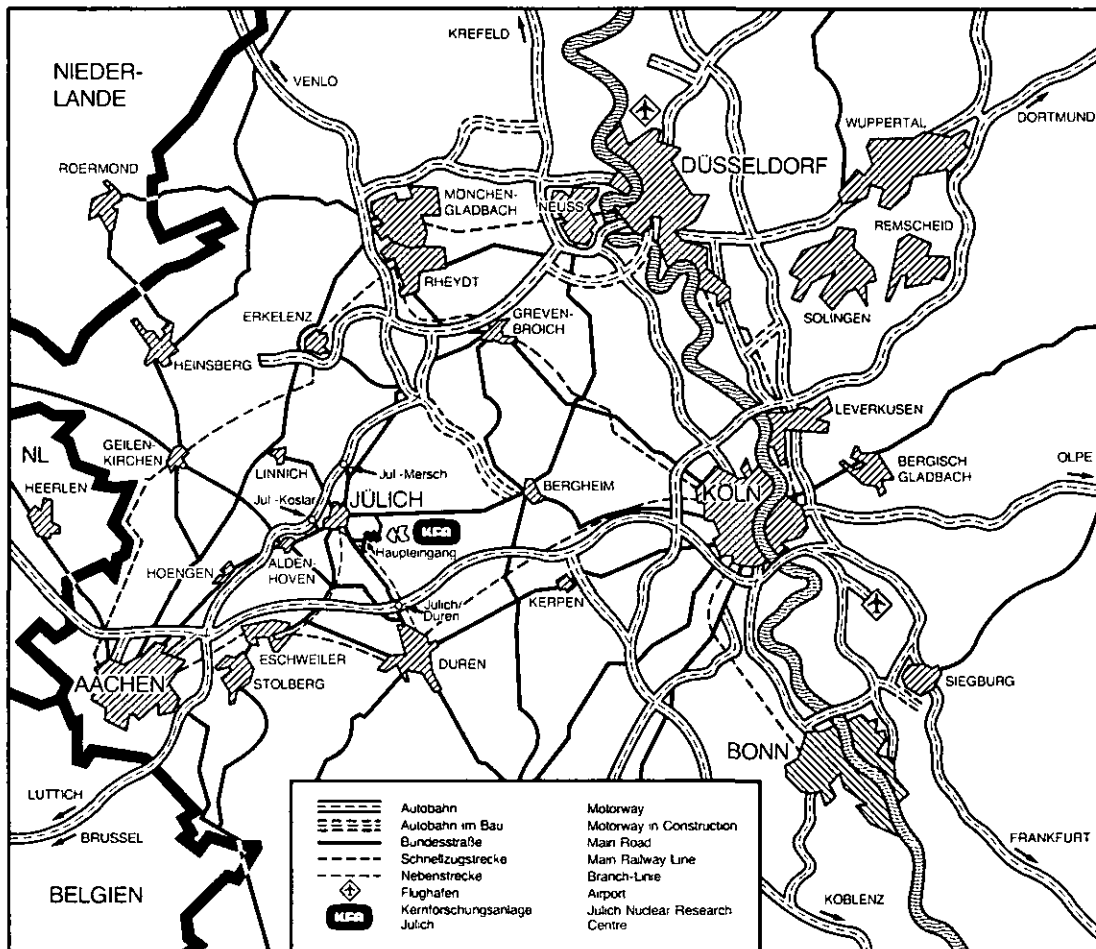
KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Institut für Nukleare Sicherheitsforschung

Untersuchungen zu Störfällen mit massivem Wassereinbruch am Beispiel des Kugelhaufenreaktors PNP-500

von
Rainer Moormann

Jül-Spez-333
Oktober 1985
ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 333
 Institut für Nukleare Sicherheitsforschung Jül-Spez-333

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH
 Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)
 Telefon: 02461/610 · Telex: 833556-0 kf d

**Untersuchungen zu Störfällen
mit massivem Wassereinbruch
am Beispiel des
Kugelhaufenreaktors PNP-500**

von
Rainer Moormann

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
ZUSAMMENFASSUNG	
1. EINLEITUNG	1
1.1 Grundlegende Informationen	1
1.2 Kenntnisstand zu Wassereinbruchstörfällen	2
1.3 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	3
2. DIE HTR-ANLAGE PNP-500	4
3. RECHENMODELL UND DATENBASIS ZUR STÖRFALLANALYSE	6
3.1 Der Computercode REACT/THERMIX	6
3.2 Kinetische Daten der chemischen Reaktionen	6
4. STÖRFALLANNAHMEN	9
5. ERGEBNISSE DER STÖRFALLRECHNUNGEN	11
5.1 Graphitkorrosion und Corethermodynamik	11
5.1.1 Transiente Vorgänge im Core	11
5.1.2 Gesamter Graphitabbbrand und Wasserdampfumsatz	12
5.1.2.1 Abhängigkeit vom NWA-Durchsatz	12
5.1.2.2 Abhängigkeit von der Wasserdampfmenge	12
5.1.3 Wärmeverbrauch durch die chemischen Reaktionen	13
5.1.4 Korrosionsschäden an den Brennelementen	13
5.1.5 Korrosionsschäden an den Graphitkomponenten	13
5.1.6 Einfluß einer Verzögerung im Start der NWA-Systeme	14
5.1.7 Einfluß der Einbruchrate	14
5.1.8 Einfluß von Unsicherheiten in der chemischen Kinetik	15
5.1.8.1 Inhibierung durch Produktgase	15
5.1.8.2 Reaktionsraten bei hohem Systemdruck	15
5.2 Druckaufbau im Primärkreis	15
5.3 Spaltproduktfreisetzung in das Reaktorschutzgebäude	17
5.4 Bildung zündfähiger Gasgemische	17
6. SCHLUSSBEMERKUNG	19
7. LITERATUR	21
8. ABKÜRZUNGEN; SYMBOLE	23
9. TABELLEN; ABBILDUNGEN	24

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit enthält eine mit dem Computercode REACT/THERMIX durchgeführte Analyse massiver Wassereinbruchstörfälle beim Hochtemperaturreaktorkonzept PNP-500; ein Schwerpunkt dieser Untersuchung liegt in den Graphitkorrosionsprozessen. Bei den betrachteten Störfällen wird ein korrektes Funktionieren der Reaktorschnellabschaltung angenommen, die in den Primärkreis einströmende Wassermenge variiert zwischen 1000 und 7500 kg (d.h. bis in den hypothetischen Bereich). Die Sensitivität der Störfallauswirkungen hinsichtlich verschiedener Parameter wie Intensität und Startzeitpunkt der konvektiven Nachwärmeabfuhr und chemisch-kinetischer Daten der Graphitkorrosionsprozesse wird aufgezeigt.

Zusammenfassend betrachtet zeigen die Ergebnisse, daß auch bei ungünstigen Parameterkombinationen das Ausmaß der Graphitkorrosion so gering bleibt, daß keine wesentliche Schädigung von Brennelementen oder Graphitkomponenten eintritt. Eine Primärkreisdruckentlastung aufgrund des Wassereinbruchs kann zwar nicht ausgeschlossen werden, jedoch ist eine Beeinträchtigung der Wirksamkeit des (druckhaltenden) Reaktorschutzgebäudes als Spaltproduktbarriere durch die Druckentlastung in Verbindung mit einer gegebenenfalls erfolgenden lokalen Verbrennung von Wassergas nicht zu erwarten. Das durch diese Störfälle bedingte Risiko ist daher gering.

ABSTRACT

The computer code REACT/THERMIX is used for analyses of massive water ingress accidents in the High-Temperature Gas Cooled Reactor concept PNP-500 with a pebble bed core; the analyses are mainly focussed on graphite corrosion processes. For the investigated accidents a correct reactor shut down is assumed; the mass of water ingressing into the primary circuit is varied between 1000 and 7500 kg (that means up to hypothetical values). The dependence of accident consequences on parameters as intensity and starting time of the afterheat removal system or kinetic values of the chemical processes is examined.

The results show, that also under pessimistic assumptions the extent of the graphite corrosion is relatively low; significant damaging of the fuel elements or of the graphite components does not occur. A primary circuit

depressurization in combination with a local burning of water gas would probably not affect the fission product retention potential of the (gas-tight) containment. Summing up, the risk caused by these accidents remains small.

1. EINLEITUNG

1.1 Grundlegende Informationen

Leckagen von wasserdampfführenden Leitungen im Primärkreis von heliumgekühlten Hochtemperaturreaktoren (HTR) gehören zu den Ereignissen mit relativ hoher Eintrittswahrscheinlichkeit; das liegt u.a. darin begründet, daß der Druck im Wasser/Dampf-Kreislauf von HTR mit > 100 bar deutlich über dem Primärkreisdruck (≤ 60 bar) liegt. Die verhältnismäßig hohe Eintrittswahrscheinlichkeit bezieht sich auf kleine Dampferzeugerlecks (Wasserdampfaustrittsraten $\leq 0,5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) während große Lecks (Austrittsraten $\geq 11 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) um mehr als 2 Größenordnungen weniger wahrscheinlich sind /9/. Aufgrund eines kleinen Lecks im Dampferzeuger gab es beispielsweise 1978 im Demonstrationsreaktor AVR einen Wassereinbruch /14/, der sich in einer Abkühlphase nach Abschaltung des Reaktors ereignete und keine sicherheitsgefährdenden Konsequenzen mit sich brachte. Aufgrund ihrer Häufigkeit müssen Wassereinbrüche in den Primärkreis daher in gewissen Grenzen als Auslegungstörfälle angesehen werden; dementsprechend sind in den HTR-Konzepten Vorkehrungen zur Vermeidung unzulässiger Auswirkungen dieser Wassereinbrüche vorgesehen.

Zur Erfassung der Auswirkungen von Wassereinbruchstörfällen spielt die Untersuchung der Graphitoxidation (an Brennelementen, Reflektoren, Coretragstruktur) durch den Wasserdampf eine besondere Rolle; die dabei dominierende Reaktion



verläuft endotherm ($\Delta H_R = 131 \text{ kJ mol}_C^{-1}$) und unter Verdopplung des Gasvolumens. Das Produktgasgemisch (Wassergas) ist brennbar. Durch die Graphitoxidation kann es zu einer Schädigung (Festigkeitsverlust) von Graphitkomponenten kommen; denkbar ist auch eine korrosionsbedingte Spaltproduktfreisetzung aus den Brennelementen. Neben den mit Graphitoxidation zusammenhängenden Prozessen muß bei Wassereinbrüchen ein weiterer, zur Spaltproduktfreisetzung beitragender Effekt berücksichtigt werden: durch Wasser kann es zu einer Abtragung der auf den metallischen Primärkreiskomponenten sorbierten Spaltprodukte kommen (wash-off).

Sicherheitsrelevante Auswirkungen bei Wassereinbruchstörfällen sind aber nur dann zu erwarten, wenn während des Störfalls eine Primärkreisdruckentlastung stattfindet; der Druckanstieg im Primärkreis aufgrund des eingedrun- genen Wasserdampfs (Wasserdampfmengen im Tonnen-Bereich führen bei den gän- gigen HTR-Primärkreisvolumina zu Druckanstiegen im bar-Bereich) und der Vo- lumentzunahme bei seiner Reaktion mit dem Graphit kann z.B. zum Ansprechen des Primärkreissicherheitsventils führen, wobei (wegen der hohen Temperaturen und des hohen Wasserdampfgehalts des ausströmenden Gases) angenommen werden muß, daß es fehlerhaft nicht wieder schließt. Das Leck in der Primärkreisum- schließung läßt diese als wesentliche Barriere gegen Spaltproduktfreisetzung weniger wirksam werden; außerdem kann das bei der Druckentlastung ausströ- mende wassergashaltige Gasgemisch im Reaktorschutzgebäude (RSG) zündfähige Mischungen bilden, deren Abbrennen die Rückhaltefunktion des RSG für Spalt- produkte möglicherweise beeinträchtigen würde.

1.2 Kenntnisstand zu Wassereinbruchstörfällen

Im Rahmen der Risikostudien AIPA /1, 23/ und PSH /9/ wurden für den HTR-1160 mit blockförmigen Brennelementen umfangreiche Untersuchungen zum Wasserein- bruch ausgeführt; dabei wurde gefunden, daß die Risiken von Wassereinbruch- störfällen deutlich unter denjenigen von Coreaufheizstörfällen liegen.

Auch für Kugelhaufenreaktoren deutscher Baulinie wurden einzelne Analysen zum Wassereinbruch veröffentlicht: so wurde für den THTR-300 gezeigt, daß bei einer Störfallkombination von massivem Wassereinbruch mit gleichzeiti- gem Ausfall einer aktiven Komponente der Reaktoranlage sicherheitstechnische Grenzwerte nicht überschritten werden /2/. Im Rahmen einer planungsbeglei- tenden Studie für den PNP-500 wurde der Ablauf massiver Wassereinbruchstör- fälle (eindringende Wassermenge: 3800 kg) bei verschiedenen Strategien zur Nachwärmeabfuhr (NWA) untersucht /4/; trotz einiger konservativer Grundan- nahmen in den Analysen bleiben diese Störfälle aus dem Blickwinkel der Gra- phitkorrosion sicherheitstechnisch beherrschbar. Für kleine Kugelhaufenre- aktoren bzw. Reaktorkonzepte wie AVR /6, 8/, AVR II /7/ sowie MODUL-HTR /30/ sind bestimmte Typen von Wassereinbruchstörfällen mit teilweise fehlerhaftem Antwortverhalten der Reaktoranlage analysiert worden; im Vergleich zu größeren HTR-Anlagen ist bei kleinen HTR der relative Beitrag von Wassereinbruchstör- fällen zum Risiko höher, da die bei größeren HTR risikodominanten Kernauf- heizstörfälle bei kleinen HTR wegen der niedrigen maximalen Störfalltempe-

raturen kaum von Bedeutung sind.

Störfallanalysen zum simultanen, massiven Wasser- und Lufteinbruch wurden für das PNP-500-Konzept ausgeführt /10, 11/; die betrachteten Störfälle verlaufen hinsichtlich der chemischen Vorgänge nicht ungünstiger als entsprechende reine Lufteinbruchstörfälle, für die bereits früher ein relativ gutmütiges Verhalten des PNP-500 aufgezeigt wurde /12, 28, 29/.

Hypothetische Wassereinbruchstörfälle ohne Reaktorschnellabschaltung (RSA) wurden am Beispiel des PNP-500 betrachtet, wobei das Reaktivitätsverhalten im Vordergrund stand /3, 5/; bei der maximal möglichen Wasserdampfeinbruchrate von $55 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ liegt die tolerierbare Verzögerungszeit für das Eingreifen der Abschaltssysteme bei ca. 1 min.

1.3 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Die bisher durchgeführten Störfalluntersuchungen zeigen zwar, daß keine sicherheitstechnisch bedeutsamen Folgen von Wassereinbrüchen zu erwarten sind; diese Störfallanalysen beschränkten sich aber auf bestimmte, für Genehmigungsverfahren oder Risikobetrachtungen relevante Fälle, ohne daß eine umfassende Analyse zur Sensitivität der Auswirkungen gegenüber einer Variation wesentlicher Störfallparameter ausgeführt worden wäre. Hier liegt ein Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit, in der am Beispiel des PNP-500 für Wassereinbruchstörfälle mit ordnungsgemäß funktionierender RSA die Auswirkungen (Graphitkorrosion, Druckaufbau im Primärkreis, Spaltproduktfreisetzung in das RSG, zündfähige Gasgemische im RSG) in Abhängigkeit unter anderem von einbrechender Wassermenge, NWA-Durchsatz und -Startzeitpunkt ermittelt werden sollen. Die Störfallrechnungen werden mit dem Code REACT/THERMIX /15/ durchgeführt. Der PNP-500 wurde trotz seiner derzeit geringen Aktualität als Basis dieser Analyse gewählt, weil dessen Konzeptunterlagen zum Zeitpunkt des Analysenbeginns am weitesten fortgeschritten waren und sein Störfallverhalten bei Wassereinbruch als in vielen Punkten repräsentativ für HTR mittlerer und größerer Leistung angesehen werden darf. Allerdings enthält das RSG neuerer Reaktorkonzepte (z.B. HTR-500) im Unterschied zum PNP-500 keinen gasdichten Innenliner (nicht druckhaltendes RSG).

2. DIE HTR-ANLAGE PNP-500

Das Konzept des Kugelhaufenreaktors PNP-500 ist im Detail in /13/ dargestellt, kurze Beschreibungen der Anlage finden sich in /3, 12, 29/; hier sei daher nur auf die wichtigsten Systemeigenschaften eingegangen. Ein Coreschema dieser zur Prozeßwärmeerzeugung geplanten Anlage enthält Abb. 1a; die Hauptauslegungsdaten des PNP-500 sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Nachfolgend sei noch auf einige zum Verständnis von Wassereinbruchstörfällen wichtige Einzelheiten des PNP-Konzepts hingewiesen: die Reaktoranlage enthält 3 Haupt- und 4 NWA-Kühlkreisläufe; ein He/H₂O-Wärmetauscher (Dampferzeuger) ist nur in dem zur hydrierenden Kohlevergasung (HKV) vorgesehenen Kreislauf vorhanden. Der im HKV-Loop vorhandene Röhrenspaltofen weist sekundärseitig zwar auch eine hohe Wasserdampfkonzentration auf, jedoch liegt der Druck auf der Sekundärseite bei nur 45 bar, so daß ein Überströmen größerer Wasserdampfmengen in den Primärkreis wenig wahrscheinlich ist. Die anderen Hauptkreisläufe sind über Zwischenkreisläufe von wasserdampf führenden Leitungen getrennt. Die NWA-Systeme enthalten He/He-Wärmetauscher, wobei die Wärmeauskopplung des Sekundärkreises über Luftkühler erfolgt. Massiver Wassereinbruch in den Primärkreis ist damit praktisch nur über den Dampferzeuger des HKV-Loops möglich. Das bei einigen HTR-Anlagen zur Stromerzeugung wegen des Vorhandenseins mehrerer He/H₂O-Wärmetauscher auftretende Problem der Identifizierung des defekten Wärmetauschers nach Feststellung eines Wassereinbruchs /1, 31/ ist bei der PNP-500-Anlage daher nicht gegeben, und das mit fehlerhafter Identifizierung verbundene Störfallspektrum ist auszuschließen.

Die Detektion von Wassereinbrüchen im PNP-500 geschieht durch spezielle Feuchtemeßsysteme: beim Erreichen einer Konzentration von 500 vpm Wasserdampf erfolgt eine RSA. Bei Versagen der Feuchtedetektion wird der Wassereinbruch zu einem etwas späteren Zeitpunkt durch den Druckanstieg im Primärkreis und durch die Erhöhung der nuklearen Leistung aufgrund des Moderationseffekts des Wasserdampfs erkannt, was ebenfalls zu einer RSA führt. Neben dieser RSA veranlaßt das Reaktorschutzsystem die folgenden Aktionen:

- die Hauptkühlsysteme werden abgefahren und die Reaktorkühlung wird vom NWA-System übernommen, welches 5 min nach der RSA in Betrieb geht.
- der Dampferzeuger wird vom Primärkreislauf durch Schließen der Gebläseabschlußklappen abgetrennt.

- die Speisewasserzufuhr im Dampferzeuger wird unterbrochen.

Eine Dampferzeugerentlastung ist im Störfallbeherrschungskonzept des PNP-500 noch nicht festgeschrieben. Analog zu anderen HTR-Konzepten ist aber davon auszugehen, daß der Dampferzeuger nach Feuchtedetektion entlastet wird.

Bei fehlerfreiem Antwortverhalten der Reaktoranlage liegt zwischen Beginn eines massiven Wassereinbruchs einerseits und Abtrennung des Dampferzeugers vom Primärkreis sowie Absperrung der Speisewasserzufuhr andererseits ein Zeitraum von ca. 10 s. Aus der in dieser Zeit in den Dampferzeuger eingespeisten Wassermenge (550 kg) und dem Gehalt des Dampferzeugers (3260 kg) wird für korrektes Anlagenverhalten als obere Grenze der in den Primärkreis einbrechenden Wassermenge ein Wert von ca. 3800 kg erhalten; unter Berücksichtigung der Versagenswahrscheinlichkeiten für die o.g. Aktionen des Reaktorschutzsystems /9,36/ müssen Störfälle mit deutlich größeren einbrechenden Wassermengen als hypothetisch eingestuft werden.

3. RECHENMODELL UND DATENBASIS ZUR STÖRFALLANALYSE

3.1 Der Computercode REACT/THERMIX

Zur Analyse von Wasser- und Lufteinbruchstörfällen in HTR wurde an der KFA Jülich der Computercode REACT/THERMIX entwickelt /15/; dieses auf einem Differenzenverfahren aufbauende Rechenprogramm bildet das HTR-Core zweidimensional ab. Es besteht aus separaten Modulen zur Berechnung von Feststofftemperaturen, Gastemperaturen und Konvektionsbedingungen sowie zur Beschreibung der chemischen Prozesse. Diese Modulen sind so gekoppelt, daß chemische und thermohydraulische Prozesse quasisimultan berechnet werden. Für den Primärkreisbereich außerhalb des Cores sowie das RSG sind in REACT/THERMIX relativ einfache Modelle enthalten. Zur Berechnung thermophysikalischer Stoffwerte von Gasmischungen wird der Code PRIAMUS /19/ von REACT/THERMIX aufgerufen.

Von den in REACT/THERMIX berücksichtigten chemischen Reaktionen ist bei Wassereinbruchstörfällen neben der heterogenen Reaktion (1) noch die homogene water-shift-Reaktion



von Bedeutung.

3.2 Kinetische Daten der chemischen Reaktionen

Zur Erfassung der Kinetik von Reaktion (2) werden in REACT/THERMIX Literaturdaten /27/ verwendet. Wesentlich komplexer gestaltet sich demgegenüber die Beschreibung der Kinetik von Reaktion (1): bei Gas/Feststoff-Reaktionen mit ausschließlich gasförmigen Produkten unterscheidet man nach Wicke 3 Temperaturzonen /20/, in denen chemische Elementarprozesse bzw. Transportvorgänge in unterschiedlichem Umfang die Reaktionsgeschwindigkeit beeinflussen: bei tiefen Temperaturen (Reaktion (1) bei HTR-Wassereinbruchstörfällen: $< 850^\circ\text{C}$) ist nur die chemische Umsetzung geschwindigkeitsbestimmend (chemischer Bereich); wegen der unter diesen Bedingungen relativ niedrigen Umsatzraten ist dieser Bereich für Störfalluntersuchungen von nur untergeordneter Bedeutung. Zwischen ca. 850 und 1200°C liegt der "Porendiffusionsbereich", in dem auch Diffusionsprozesse im Porensystem Auswirkungen auf die Graphit-

umsatzrate haben. Bei Temperaturen $>1200^{\circ}\text{C}$ bestimmt allein der Stoffübergang in der Strömungsgrenzschicht den Graphitumsatz; hier treten daher die relativ genau bekannten Stoffübergangsgesetze an die Stelle der kinetischen Gleichungen.

Die chemische Kinetik in dem für die Störfallanalysen besonders wichtigen Porendiffusionsbereich sei nachfolgend diskutiert: die Erfassung der Korrosionsvorgänge in diesem Bereich gestaltet sich deshalb besonders schwierig, weil ein Konzentrationsprofil der korrosiven Gase im Graphit auftritt, welches einen Korrosionsgradienten zur Folge hat. Durch die Korrosionsvorgänge werden dann sowohl die chemische Reaktivität als auch die effektiven Transportparameter orts- und zeitabhängig verändert; diese Veränderungen sind aber - wegen des Fehlens eines hinreichenden Porenmodells - theoretisch noch nicht ausreichend genau erfaßbar.

Auf der Basis theoretischer Überlegungen kann aber gezeigt werden, daß sich die Reaktionsrate im Porendiffusionsbereich unter isothermen Bedingungen näherungsweise durch den Ansatz /26/

$$R_{G_F} = \frac{k_1 \cdot p_{ED}}{1 + k_2 \cdot p_{ED}^{0.5} + k_3 \cdot p_{PROD}^{0.5}} f(B) \cdot f(c) \cdot f(p_{GES}) \quad (3)$$

ausdrücken läßt; bei kleinen Eduktpartialdruckwerten ($k_2 \cdot p_{ED}^{0.5} \ll 1$) ist die Reaktionsrate proportional p_{ED} , bei hohen Eduktkonzentrationen ($k_2 \cdot p_{ED}^{0.5} > 1$) ist eine Abhängigkeit entsprechend $p_{ED}^{0.5}$ vorhanden. Eine Reaktionsinhibition durch die Produktgase wird durch den Term $k_3 \cdot p_{PROD}^{0.5}$ berücksichtigt. Die Abhängigkeit der Reaktionsrate vom Korrosionsgrad wird durch die Funktion $f(B)$ ausgedrückt: die korrosionsbedingten Änderungen von Reaktivität und effektivem Diffusionskoeffizienten führen zu einem Anstieg der Korrosionsrate mit dem Abbrand bis zu einem Sättigungswert; die $f(B)$ -Funktion ist im Falle der Graphitoxidation nur empirisch zu ermitteln. Änderungen der Transportparameter aufgrund variabler Gaszusammensetzung werden durch die Funktion $f(c)$ erfaßt; bei großem Heliumüberschuß im Gas braucht diese Abhängigkeit nicht berücksichtigt zu werden. Die in $f(p_{GES})$ enthaltene Gesamtdruckabhängigkeit der Rate wird wesentlich davon bestimmt, nach welchen Mechanismen der Gastransport im Porensystem abläuft: soweit die Knudsendiffusion vorherrscht, ist keine Druckabhängigkeit zu erwarten, während normale Gasdiffusion zu $f(p_{GES}) = p_{GES}^{-0.5}$ führt /17/. Aufgrund von Messungen des effektiven Diffusionskoeffizienten bei Raumtemperatur im Druckbereich 0,01-1 bar /21/

kann abgeleitet werden, daß bei den gängigen HTR-Graphiten unter den Korrosionsbedingungen des Wassereinbruchstörfalls ($p_{GES} \geq 40$ bar, $T \geq 800^\circ\text{C}$) die normale Gasdiffusion überwiegt. Messungen zur Kinetik der Reaktion (1) an Nukleargraphiten unter störfallnahen Bedingungen liegen bisher in nur geringem Umfang vor /18, 22, 35/, so daß die Extrapolation von bei niedrigem Gesamtdruck gewonnenen Daten erforderlich wird; da bei niedrigem Druck aber die Knudsendiffusion eine größere Rolle spielt, ist diese Extrapolation mit Unsicherheiten behaftet. Zur Verringerung dieser Unsicherheiten müssen weitere Messungen bei hohem Systemdruck ausgeführt werden.

In dieser Arbeit werden die nachfolgend angegebenen Koeffizienten von Gleichung (3) benutzt:

$$\begin{aligned} k_1 &= 7200 \cdot \exp(-17000/T) \quad \text{mg}_C \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1} \\ k_2 &= 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(7000/T) \cdot \text{bar}_{\text{H}_2\text{O}}^{-0.5} \\ k_3 &= 0 \text{ bzw. } k_3 = 4,4 \cdot 10^{-4} \exp(12500/T) \cdot \text{bar}_{\text{CO}+\text{H}_2}^{-0.5} \\ f(B) &= 1. \\ f(c) &= 1. \\ f(p_{GES}) &= p_{GES}^{-0.5} \cdot \text{bar}^{-0.5} \end{aligned}$$

Diese Koeffizienten basieren auf Meßwerten an der Brennelementmatrix A3-3, überwiegend bei $1 \leq p_{GES} \leq 11$ bar /2, 6, 22/, einige Datenwerte bei 40 bar konnten zur Absicherung verwendet werden /22/. Die wenigen Meßwerte, die für das im PNP-500-Konzept vorgesehene Matrixmaterial A3-27 vorliegen, zeigen keine wesentlichen Abweichungen zu den Daten von A3-3. In konservativer Weise wurden zur Ermittlung obiger Koeffizienten nur solche Ratenwerte verwendet, die sich hinsichtlich ihrer Abbrandabhängigkeit weitgehend in der Sättigung befinden. Den ausgeprägten Unsicherheiten in Hinblick auf die inhibierende Wirkung der Reaktionsprodukte H_2 und CO wurde dadurch Rechnung getragen, daß einmal pessimistisch mit der Annahme eines vernachlässigbaren Inhibierungseffekts gerechnet wurde, daneben aber auch Rechnungen mit einem Koeffizienten k_3 ausgeführt wurden, der den aus den Daten als maximal ablesbaren Inhibierungseffekt widerspiegelt. Katalyse durch Verunreinigungen wurde nicht berücksichtigt, da abgebrannte AVR-Brennelemente keinen wesentlichen Anstieg der Korrosionsrate gegenüber frischen Brennelementen erkennen ließen.

4. STÖRFALLANNAHMEN

Den untersuchten Störfallsequenzen wird der folgende Ablauf zugrunde gelegt: durch ein größeres Leck im Dampferzeuger gelangt Wasserdampf (Einbruchrate $55 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) in den Primärkreis. Nach Detektion des Wasserdampfs bei Erreichen der 500 vpm-Schwelle wird der Reaktor abgeschaltet und die Hauptgebläse werden abgefahren. Die in den Primärkreis eindringende Wasserdampfmenge wird als Parameter mit Werten von 1000, 2500, 5000 und 7500 kg angesetzt. Es wird unterstellt, daß sich der Wasserdampf gleichmäßig über das zugängliche Primärkreisvolumen verteilt, so daß sich mit den vorher genannten Wassermengen mittlere Wasserdampfkonzentrationen im Primärkreis von 3,2, 7,5, 14 bzw. 20 v/o ergeben. Die Temperatur des einströmenden Wasserdampfs wird als gleich der mittleren Gastemperatur im Primärkreis angenommen; da nach Reaktor- und Hauptgebläseabschaltung die Energiezufuhr zum Dampferzeuger absinkt und bei großen Mengen eintretenden Wassers letzteres dann teilweise als Flüssigkeit in den Primärkreis gelangen dürfte, ist diese Annahme als konservativ anzusehen. Der Druckanstieg im Primärkreis nur aufgrund des eingedrungenen Wasserdampf liegt dann zwischen 1,3 bar (1000 kg H_2O) und 9,7 bar (7500 kg H_2O). Kondensation von Wasserdampf im Primärkreis ist innerhalb der Zeitspanne, in der Graphitkorrosionsprozesse von Bedeutung sind, nicht zu erwarten.

Um den Einfluß einer kleinen Dampfeintrittsrates bzw. einer verzögerten Verdampfung von in den Primärkreis eingedrungenem flüssigen Wasser abzuschätzen wurden auch einzelne Rechnungen ausgeführt, bei denen der Wasserdampfeintritt in den (durchströmten) Primärkreisbereich nicht vor dem (normalen) Start der NWA abgeschlossen ist, sondern sich über einen längeren Zeitraum (bis 2 h) erstreckt.

Das NWA-System des Reaktors geht 5 min nach Reaktorabschaltung mit 1, 2 oder 4 Loops in Betrieb. Der Einfluß einer um bis zu 1 h verzögerten Inbetriebnahme der NWA-Systeme wurde in einzelnen Rechnungen ebenfalls untersucht. Für den durch die NWA-Gebläse geförderten Massenstrom wurde eine Proportionalität entsprechend $\rho^{0.8}$ angesetzt /13/. Die Korrosionsrechnungen setzen erst zum Zeitpunkt des NWA-Starts ein. Die Wärmetauschercharakteristik der NWA-Loops /13/ dient zur Ermittlung der Coreeintrittstemperaturen.

Die Gastemperaturen im ausgedehnten Kaltgasbereich des Reaktors können mit den vorhandenen Rechenmodellen nur unzureichend erfaßt werden; gerade von

diesen Gastemperaturen wird der Druckverlauf im Primärkreis wesentlich mitbestimmt. Um die obere Grenze der Drucktransiente abzuschätzen, wurde konservativ angenommen, daß die Gastemperatur des Primärkreises außerhalb des Corebereichs bei den Normalbetriebswerten (im Mittel 340°C) verbleiben. Daneben wurden Rechnungen mit der Annahme ausgeführt, daß die Gastemperaturen des Kaltgasbereichs zu jedem Zeitpunkt gleich den Gasaustrittstemperaturen der NWA-Loops sind; die damit berechneten Drucktransienten geben eine untere Grenze an.

5. ERGEBNISSE DER STÖRFALLRECHNUNGEN

5.1 Graphitkorrosion und Corethermodynamik

5.1.1 Transiente Vorgänge im Core

Zur Verdeutlichung der bei Wassereinbruch ablaufenden transienten Vorgänge im Core sind in Abb. 1 für einen ausgewählten Störfallverlauf die Temperaturprofile und die Graphitumsatzraten in der Coreachse für verschiedene Störfallzeiten aufgetragen; die hier zugrunde gelegten Störfallannahmen sind:

- eingedrungene Wasserdampfmenge 5000 kg;
- 1 NWA-Loop geht 5 min nach RSA in Betrieb;
- die chemische Kinetik wird ohne Inhibierung durch Produktgase berechnet;
- die Temperaturen im Kaltgasbereich sind konstant (die Graphitkorrosionsprozesse ändern sich aber bei Variation dieses Parameters kaum, s. 5.2).

Der Primärkreisdruck liegt bei diesem Störfall im Bereich von 45-48 bar. Bei einer Coredurchströmung werden maximal 25 % des in das Core eintretenden Wasserdampfes umgesetzt.

Aus Abb. 1b ist ersichtlich, daß trotz des niedrigen NWA-Durchsatzes innerhalb von weniger als 2 h eine Abkühlung der gesamten Brennelementschüttung auf Temperaturen $<750^{\circ}\text{C}$ erfolgt; unterhalb dieser Temperaturschwelle sind Graphitkorrosionsreaktionen in der hier interessierenden Zeitskala vernachlässigbar. Zu Störfallbeginn wird die konvektive Kühlung wesentlich unterstützt durch den Wärmeverbrauch aufgrund der chemischen Reaktion (1), der hier kurzzeitig einen Wert von 7 MW erreicht (vgl. dazu Abb. 4). Die endotherme Reaktion konzentriert sich auf die heißesten aber konvektiv nur wenig gekühlten Corezonen, daher tritt auch in diesem Bereich ein deutlicher Abkühlungseffekt auf, der seinerseits zu einer Reaktionsratenverminderung führt.

Die der Corekühlung parallel gehende Abnahme der Korrosionsraten ist aus Abb. 1c zu entnehmen; das Reaktionsgebiet wandert in Strömungsrichtung aus dem aktiven Core. Die Reaktionsraten und damit auch die chemischen Abbrände zeigen eine relativ breite Verteilung, ihre Maximalwerte bleiben niedrig.

Das hier skizzierte transiente Störfallgeschehen ist im Prinzip auch unter den anderen, noch zu betrachtenden Störfallrandbedingungen gültig.

5.1.2 Gesamter Graphitabbrand und Wasserdampfsatz

5.1.2.1 Abhängigkeit vom NWA-Durchsatz

Für den in 5.1.1 skizzierten Störfall sowie für entsprechende Fälle mit 2 und 4 laufenden NWA-Loops sind in Abb. 2 der gesamte Graphitabbrand bzw. die umgesetzte Wasserdampfmenge als Funktion der Störfallzeit enthalten. Wegen der schnelleren Corekühlung bei höheren NWA-Durchsätzen bleibt dann der gesamte Graphitabbrand deutlich unter demjenigen bei 1-Loop-NWA: während das Core bei 4 laufenden NWA-Loops bereits nach 0,4 h soweit abgekühlt ist, daß die Graphitkorrosionsreaktionen praktisch zum Stillstand kommen, liegt dieser Zeitraum bei 2- bzw. 1-Loop-NWA bei 1 bzw. 1,7 h. Der bei Störfallende auftretende Graphitabbrand C_E hängt mit dem NWA-Volumenstrom \dot{V}_{NWA} über $C_E \sim 1/\dot{V}_{NWA}^{0,75 \pm 0,05}$ zusammen; diese Relation gilt auch für die anderen untersuchten Wasserdampfmengen im Primärkreis.

Der Graphitabbrand C_E verteilt sich bei 1-Loop-NWA zu 55 % auf die Brennelementschüttung, zu 43 % auf den Bodenreflektor und zu <2 % auf die Coretragsäulen. Bei 4 laufenden NWA-Loops sinkt der Anteil der Schüttung an C_E zugunsten von Bodenreflektor und Tragsäulen auf 42 % ab. Die umgesetzte Wasserdampfmenge liegt (wegen der höheren Molmasse) um einen Faktor von 1,5 über dem entsprechenden Graphitabbrand.

5.1.2.2 Abhängigkeit von der Wasserdampfmenge

Der gesamte Graphitabbrand ist in Abb. 3 als Funktion der Störfallzeit für 1-Loop-NWA für Wasserdampfmengen im Primärkreis zwischen 1000 und 7500 kg aufgetragen; die weiteren Störfallrandbedingungen entsprechen den vorher genannten. Mit zunehmender Wasserdampfmenge steigen auch der Graphitabbrand C_E bzw. der Wasserdampfsatz an, jedoch insbesondere im Bereich größerer Wasserdampfmengen deutlich schwächer als proportional: der gesamte relative Wasserdampfsatz zu Störfallende sinkt von 60 % bei einem Wassereinbruch von 1000 kg auf 20 % bei 7500 kg Wasser. Letzteres liegt zum einen darin begründet, daß die Graphitumsatzrate bei hohen Wasserdampfkonzentrationen dieser nicht mehr proportional ist (s. Gleichung (3)), zum anderen ist zu berücksichtigen, daß bei größeren Wassermengen im Primärkreis der Abkühlungseffekt aufgrund der höheren Molwärme von Wasserdampf gegenüber Helium sowie aufgrund des endothermen chemischen Prozesses größer ist.

5.1.3 Wärmeverbrauch durch die chemischen Reaktionen

In Abb. 4 ist für einige Störfallabläufe der Wärmeverbrauch durch die chemischen Reaktionen zeitabhängig dargestellt. Da hinsichtlich des chemischen Enthalpiebeitrages die Reaktion (1) gegenüber der Reaktion (2) überwiegt, sind die in Abb. 4 wiedergegebenen Funktionsverläufe in guter Näherung der gesamten Graphitumsatzrate proportional. Entsprechend der größeren Corekühlrate sinkt bei 4-Loop-NWA der chemische Wärmeverbrauch zeitabhängig schneller als bei 1 laufenden NWA-Loop. Der zu Störfallbeginn für einen kurzen Zeitraum höhere Anfangswert im chemischen Wärmeverbrauch bei 4-Loop- gegenüber 1-Loop-NWA ist darauf zurückzuführen, daß der relative Wasserdampfumsatz pro Core-durchsatz mit steigendem NWA-Massenstrom sinkt: solange die Coretemperaturen nicht wesentlich voneinander abweichen, resultiert die insgesamt höhere Wasserdampfkonzentration im Core bei 4-Loop-NWA nämlich in einer höheren Graphitabbrandrate und damit einem größeren chemischen Wärmeverbrauch als bei 1-Loop-NWA.

Der Beitrag des chemischen Wärmeverbrauchs zur gesamten Wärmeabfuhr aus dem Corebereich liegt zu Störfallbeginn zwischen 8 % (1000 kg H_2O) und 27 % (7500 kg H_2O).

5.1.4 Korrosionsschäden an den Brennelementen

Die Abb. 5 enthält die zeitabhängigen maximalen Abbrände (oberflächenbezogen) bzw. Korrosionsgrade der Brennelemente für 4 unterschiedliche Störfallsequenzen. Hinsichtlich der Abhängigkeit des maximalen Korrosionsgrades von Wasserdampfmenge bzw. NWA-Durchsatz gilt Ähnliches, wie in 5.1.2 für den gesamten Graphitabbrand ausgeführt wurde. Da die brennstofffreie äußere Schale etwa 40 w/o eines Brennelementes umfaßt, ist bei dem hier erreichten maximalen Korrosionsgraden von 1,6 w/o eine Beeinträchtigung der Brennstoffpartikel durch den Korrosionsvorgang nicht zu erwarten; das gilt auch, wenn die Korrosionseindringtiefe in den Graphit (hier ≈ 2 mm) in Rechnung gestellt wird. Zu Störfallende liegt der maximale Korrosionsgrad der Brennelemente um etwa den Faktor 4 über dem mittleren Korrosionsgrad in der Schüttung.

5.1.5 Korrosionsschäden an den Graphitkomponenten

Die Graphitkorrosionsprozesse führen bei 1-Loop-NWA und 5000 kg Wasserdampf

im Primärkreis bei den Bohrungen (\varnothing 16 mm) des Bodenreflektors unter der Annahme reiner Oberflächenkorrosion zu einer Aufweitung von maximal 0,4 mm, was als unkritisch anzusehen ist. Lokale maximale Korrosionsgrade von 0,2 % treten im genannten Fall an den Coretragsäulen (\varnothing 100 mm) auf; deren Tragfunktion wird dadurch nur unerheblich beeinträchtigt.

5.1.6 Einfluß einer Verzögerung im Start der NWA-Systeme

Solange die NWA-Systeme nicht in Betrieb genommen sind, kommt es zu einer adiabaten Aufheizung im Corebereich, wobei allerdings die coreinterne Naturzirkulation in Richtung auf eine Temperaturnivellierung wirkt. Für den NWA-Start (1 Loop) nach 0,5 bzw. 1 h adiabater Coreaufheizung bei 5000 kg Wasser im Primärkreis wurden Rechnungen ausgeführt und mit den Ergebnissen für den NWA-Start 5 min nach Reaktorabschaltung verglichen; der gesamte Graphitabbrand dieser 3 Fälle ist in Abb. 6 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, daß ein NWA-Start 1 h nach Reaktorabschaltung zu einem Anstieg im Graphitumsatz C_E um etwa 50 % gegenüber NWA-Start zum korrekten Zeitpunkt führt. Mit 15 % wesentlich geringer fällt demgegenüber der durch diese Verzögerung im NWA-Start bedingte Anstieg beim maximal erreichten Brennelement-Abbrand aus. Letzteres findet seinen Grund darin, daß der Temperaturanstieg während der Coreaufheizung in den heißesten Corezonen am geringsten ist.

5.1.7 Einfluß der Einbruchrate

Rechnungen bei gleicher insgesamt eingebrochener Wassermenge mit der Einbruchrate als Parameter zeigen, daß dieser Parameter oberhalb eines von der Abkühlungsgeschwindigkeit des Cores abhängenden Schwellenwerts das Korrosionsgeschehen nicht wesentlich beeinflusst. Unterhalb dieses Schwellenwerts (d.h., wenn der Wasserdampfeinbruch sich bis in Zeiträume erstreckt, zu denen das Core unter die für schnelles Korrosionsgeschehen notwendigen Temperaturen abgekühlt ist) nehmen aber die im Störfallverlauf auftretenden Korrosionsgrade mit sinkender Einbruchrate deutlich ab. Die in dieser Arbeit an anderer Stelle wiedergegebenen Rechenergebnisse beziehen sich sämtlich auf Einbruchraten oberhalb des genannten Schwellenwertes. Eine verringerte effektive Wasserdampfeinbruchrate ergibt sich auch, wenn Wasser in flüssiger Form in den Primärkreislauf gelangt und dann verdampft; solche Fälle werden durch diese Parametervariation daher mit abgedeckt.

5.1.8 Einfluß von Unsicherheiten in der chemischen Kinetik

5.1.8.1 Inhibierung durch Produktgase

Da die bisher dargestellten Rechnungen die Reaktionsinhibierung durch Produktgase konservativ vernachlässigten, wurden zur Abschätzung der Größe dieses Effekts auch einige Rechnungen unter Berücksichtigung des in 3.2 angegebenen Inhibierungsterms ausgeführt. Aus Abb. 7 ist ersichtlich, daß bei 1-Loop-NWA und 5000 kg Wasserdampf der Graphitabbbrand C_E um etwa den Faktor 5 reduziert wird. Demgegenüber vermindert sich der maximale Brennelement-Abbrand nur um den Faktor 3. Im gleichen Größenbereich liegt die inhibierungsbedingte Abnahme der Korrosion bei den anderen Störfällen des untersuchten Parameterbereichs. Hingewiesen sei aber darauf, daß der hier demonstrierte Inhibierungseffekt an der oberen Grenze des Erwartungsbereichs liegt.

5.1.8.2. Reaktionsraten bei hohem Systemdruck

Wegen der noch schmalen Datenbasis für Reaktionsraten bei hohem Systemdruck und der Unsicherheiten bei der Ratenextrapolation von niedrigem auf hohen Druck wurde die Sensitivität der Störfallanalysen in Hinblick auf Variation der Geschwindigkeitskonstanten k_1 untersucht. Rechnungen wurden sowohl mit der im Vergleich zur Angabe in 3.2 halbierten, als auch der verdoppelten Geschwindigkeitskonstanten ausgeführt (1-Loop-NWA, 5000 kg Wasserdampf). Resultate für C_E sind in Abb. 7 enthalten: Verdoppelung bzw. Halbierung von k_1 führen zu einer Veränderung von C_E um den Faktor 1,44 bzw. 0,64. Die entsprechenden Faktoren, um die sich der maximale Brennelementabbrand ändert, sind 1,27 bzw. 0,72. Diese Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit einer experimentellen Bestimmung reaktionskinetischer Daten unter störfallnahen Bedingungen.

5.2 Druckaufbau im Primärkreis

Der Druckaufbau im Primärkreis bei Wassereinbruch wird durch die Überlagerung mehrerer Effekte bestimmt, nämlich durch Menge, Temperatur und Einbruchrate des Wasserdampfs, durch den Umfang der unter Volumenverdoppelung ablaufenden Wasserdampfumsetzung am Graphit und durch die zeitliche Änderung der Gastemperaturen im Primärkreis. Da die Wasserdampfumsetzung - wie in 5.1.2 ausgeführt - bei weitem nicht vollständig abläuft, ist deren Beitrag zum Druck-

aufbau relativ klein. Die Drucktransienten bei unterschiedlichen Annahmen hinsichtlich der Gastemperaturen im Kaltgasbereich zeigt Abb. 8 für 1-Loop-NWA und 5000 kg Wasserdampf im Primärkreis: da der Wassereinbruchvorgang bei NWA-Start abgeschlossen ist, Korrosion und Gastemperaturänderungen aber noch nicht wesentlich zum Tragen gekommen sind, gibt der zu diesem Zeitpunkt auftretende Druckanstieg (6,4 bar) den Beitrag des reinen Wassereinbruchvorgangs wieder. Die gegenläufigen Effekte von Wasserdampfumsetzung (Druckanstieg) und Gastemperaturerniedrigung (Druckabsenkung) bestimmen den weiteren Verlauf der Drucktransienten. Zwar klaffen die Kurven für konstante bzw. variable Kaltgastemperatur mit zunehmender Störfallzeit deutlich auseinander, jedoch ist aus der Abbildung auch ersichtlich, daß der zur Beurteilung des Störfallgeschehens besonders wichtige maximale Druckanstieg in erster Linie (bei variabler Kaltgastemperatur sogar fast ausschließlich) von der Wasserdampfmenge bestimmt wird. Bei konstanter Kaltgastemperatur wird das Druckmaximum (und damit eine eventuelle Primärkreisdruckentlastung) wesentlich später erreicht als bei variabler Kaltgastemperatur; wegen der mit fortschreitender Störfallzeit zunehmenden Konzentration von Wassergas im Primärkreis ist dieser Gesichtspunkt zur Beurteilung einer Bildung zündfähiger Gasmischungen im RSG (s. 5.4) von Bedeutung. Für genauere Analysen ist daher eine verbesserte Modellierung der Temperaturentwicklung im gesamten Primärkreis erforderlich. Die unterschiedlichen Annahmen für die Kaltgastemperaturen verändern die Graphitkorrosionsprozesse nur geringfügig: C_E und maximaler Brennelementabbrand variieren dabei nur um ca. 1 %.

In Abb. 9 ist der maximale Druckanstieg während der Wassereinbruchstörfälle als Funktion der eingebrochenen Wassermenge dargestellt: bei den Fällen mit variabler Kaltgastemperatur sowie bei konstanter Kaltgastemperatur und 4-Loop-NWA ist eine eingebrochene Wassermenge von 7400 bis 7600 kg notwendig, um eine Druckerhöhung im Primärkreis um 10 bar und damit den Auslegungsdruck des Druckbehälters bzw. Ansprechdruck des Sicherheitsventils zu erreichen. Die gleiche Wasserdampfmenge ist auch in den Fällen erforderlich, in denen Inhibierung durch Produktgase unterstellt wird. Bei konstanter Kaltgastemperatur und 1-Loop-NWA vermindert sich dieser Wert auf 6500 kg; startet im letztgenannten Fall die NWA erst 1 h nach RSA oder wird die Geschwindigkeitskonstante k_1 verdoppelt, reduziert sich diese Wassermenge nochmals um 500 kg. Geht man davon aus, daß beim Wassereinbruchvorgang der Dampferzeugerinhalt (3200 kg) vollständig in den Primärkreis gelangt, so muß daher zusätzlich die Dampferzeugerbespeisung noch ca. 1 min in Betrieb sein, damit

der Ansprechdruck des Primärkreissicherheitsventils erreicht wird. Kleinere Wassermengen können diesen Druckanstieg nur dann bewirken, wenn der Wasserdampf mit erheblich höherer als mittlerer Primärkreistemperatur einströmt; letzteres ist nur bei verzögerter RSA oder zumindest verzögerter Abschaltung der Hauptgebläse möglich. Wegen der dann relativ früh erfolgenden Druckentlastung würden aber Graphitkorrosionsprozesse durch H_2O nur eine untergeordnete Rolle spielen.

5.3 Spaltproduktfreisetzung in das Reaktorschutzgebäude

Die Betrachtungen zur Spaltproduktfreisetzung in das RSG bei einer durch Wassereinbruch verursachten Druckentlastung sei zuerst das radiologisch besonders wichtige Cs^{137} betrachtet; dessen freigesetzte Gesamtaktivität setzt sich aus folgenden Beiträgen zusammen:

- durch Korrosion der Brennelementmatrix können von deren Kontamination ($\leq 5 \mu Ci \text{ } Cs^{137} \text{ g}_c^{-1}$ nach AVR-Betriebsergebnissen /23/) bei den untersuchten Störfällen maximal 4 Ci als $Cs^{137}OH$ freigesetzt werden
- bei $\leq 10 \text{ Ci } Cs^{137}OH$ wird der "wash off" vom Dampferzeuger durch flüssiges Wasser liegen; Wasserdampf bewirkt fast keine Abwaschung /24, 25/
- nur zum Teil freisetzbar ist die an das Staubinventar des Primärkreises gebundene Aktivität ($\leq 1 \text{ Ci } Cs^{137}$ /16/).

Mit 15 Ci bleibt die insgesamt in das RSG gelangende Cs^{137} -Aktivität daher sehr gering. Um mehr als den Faktor 2 niedriger ist die Freisetzung von Sr^{90} anzusetzen. Von geringerer radiologischer Bedeutung ist die im Kühlgas vorhandene Edelgasaktivität (ca. 100 Ci), die bei Druckentlastung in das RSG gelangt; eine weitere, radiologisch weniger bedeutende Aktivitätsquelle liegt im Tritium, das in kalten Graphitbereichen sorbiert ist und durch Wasserdampfeinwirkung (Austauschreaktion) teilweise in das Kühlgas freigesetzt wird.

5.4 Bildung zündfähiger Gasgemische

Das im Störfallablauf gebildete Wassergas tritt als nahezu äquimolare Mischung von CO und H_2 auf, d.h. die Reaktion (2) verändert unter den Bedingungen eines Wassereinbruchs die Gaszusammensetzung nur unwesentlich. Ein Gemisch von diesem Wassergas mit Luft und Helium ist bei Raumtemperatur dann

zündfähig, wenn die Wassergaskonzentration >6 v/o und die Luftkonzentration >27 v/o ist. Damit nach einer Primärkreisdruckentlastung (mit Kondensation des ausströmenden Wasserdampfes im RSG) über das gesamte RSG gemittelt die zündfähige Wassergaskonzentration erreicht wird, müssen im Core mindestens ca. 3600 kg Wasserdampf umgesetzt werden, was einem Graphitabbbrand von 2400 kg entspricht. Solche Umsätze wurden in den vorher dargestellten Störfallrechnungen auch unter ungünstigen Parameterkombinationen nicht gefunden.

Lokale Zündfähigkeit ist demgegenüber möglich, soweit das aus dem Primärkreis austretende Gasgemisch (ohne Berücksichtigung des im RSG kondensierenden Wasserdampfes) $>8,2$ v/o Wassergas (zündfähiges Gasgemisch bei Raumtemperatur) bzw. $>5,0$ v/o Wassergas (zündfähiges Gasgemisch bei 250°C) enthält; dazu ist ein Graphitumsatz von 925 bzw. 565 kg erforderlich. Legt man in konservativer Weise die einem Graphitabbbrand von 1200 kg entsprechende Wassergasmenge zugrunde und berechnet den Druckanstieg im RSG durch deren vollständige Verbrennung, errechnet sich ein Maximaldruck von 3,5 bar. Die Integrität der RSG-Umschließung wird durch diesen Druckanstieg voraussichtlich nicht gefährdet: Der Auslegungsdruck des RSG liegt bei 3,0 bar; Untersuchungen für Leichtwasserreaktoren haben gezeigt, daß erst bei Druckwerten von 50 % über dem Auslegungswert mit einer Beeinträchtigung der Gasdichtheit des RSG zu rechnen ist.

Der Vollständigkeit halber sei darauf verwiesen, daß zündfähige Gase im RSG des PNP-500 auch in Zusammenhang mit Leckagen der Prozeßgas führenden Leitungen untersucht werden müssen; diese Problematik wird an anderer Stelle betrachtet /32, 33, 34/.

6. SCHLUSSBEMERKUNG

Die wesentlichen Ergebnisse der hier dargestellten Störfallrechnungen für massive, teilweise dem hypothetischen Bereich zuzuordnende Wassereinbruchstörfälle im PNP-500 sind:

- der Umfang der Graphitkorrosion nimmt mit Vergrößerung der eingebrochenen Wasserdampfmenge oder Verringerung des NWA-Durchsatzes nur deutlich unterproportional zu.
- auch bei ungünstigen Parameterkombinationen wie großen eingebrochenen Wassermengen bei geringen NWA-Volumenströmen bleiben die Graphitkorrosionsprozesse im Core so begrenzt, daß nicht wesentlich mehr als 1000 kg Graphit abgebrannt werden. Die Korrosionserscheinungen an den Graphitkomponenten beeinträchtigen die Anlagensicherheit nicht; der mittlere Korrosionsgrad der Brennelemente liegt bei $\leq 0,5 \%$.
- die Freisetzung von Spaltprodukten in die Primärkreisatmosphäre aufgrund des Wassereinbruchs beschränkt sich auf die durch Korrosion aus der Brennelementmatrix abgetragene Menge ($\leq 4 \text{ Ci Cs}^{137}$) sowie auf die Abwaschung von am Dampferzeuger sorbierten Spaltprodukten ($\leq 10 \text{ Ci Cs}^{137}$). Auch bei den am stärksten durch die Korrosion angegriffenen Brennelementen werden die Brennstoffpartikel nicht geschädigt.
- der Auslegungsdruck des Reaktordruckbehälters kann bei großen eingebrochenen Wassermengen erreicht werden; damit erfolgt eine Primärkreisdruckentlastung in das RSG über das (als nicht wieder schließend anzunehmende) Sicherheitsventil.
- die Funktion des RSG als Spaltproduktbarriere wird durch eine Primärkreis-Druckentlastung in Kombination mit Verbrennung von bei der Graphitkorrosion gebildetem Wassergas voraussichtlich nicht gefährdet.

Insgesamt betrachtet darf daher festgestellt werden, daß aus den hier dargestellten Wassereinbruchstörfällen beim PNP-500 keine gravierenden Sicherheitsrisiken entstehen. Zukünftige Störfallanalysen zum Wassereinbruch müssen sich auf die in letzter Zeit stärker in den Vordergrund tretenden kleinen HTR ohne konvektives NWA-System konzentrieren; bei solchen Systemen weicht das Störfallgeschehen erheblich von dem ab, was hier für größere HTR am Beispiel des PNP-500 dargestellt wurde. Für diese weiteren Analysen sollten die Kenntnislücken geschlossen werden, die in der vorliegenden Arbeit sichtbar

wurden; sie betreffen insbesondere die chemisch-kinetischen Daten der Graphitkorrosionsreaktion (1) unter störfallnahen Bedingungen sowie die modellmäßige Beschreibung des Kaltgasbereiches im Primärkreis.

7. LITERATUR

- / 1/ Barsell, A.W., M.B. Perroomian: GA-A 13171 (1975)
- / 2/ Kubaschewski, P., B. Heinrich: Reaktortagung (1978), Hannover, Proc. S. 331-34
- / 3/ Nabbi, R., W. Jahn, G. Meister, W. Rehm: Nucl. Techn. 62 (1983) 172
- / 4/ Moormann, R., K. Schultes: Jahrestagung Kerntechnik (1981), Düsseldorf, Proc. S. 199-202
- / 5/ Nabbi, R., G. Meister, W. Jahn, W. Rehm: Jahrestagung Kerntechnik (1981), Düsseldorf, Proc. S. 187-91
- / 6/ Wischnewski, R.: Dissertation RWTH Aachen (1974)
- / 7/ Moormann, R., W. Katscher: Beiträge in Jül-Spez-199 (1983)
- / 8/ Wawrzik, U.: Dissertation RWTH Aachen (1983)
- / 9/ Sicherheitsstudie für HTR-Konzepte unter deutschen Standortbedingungen, Jül-Spez-136 Bd. 4 (1982)
- /10/ Moormann, R., W. Katscher, H.-K. Hinssen: Jahrestagung Kerntechnik (1980), Düsseldorf, Proc. S. 183-86
- /11/ Katscher, W., R. Moormann: Jül-Conf-43 (1981) 43-52
- /12/ Moormann, R., W. Katscher, H.-K. Hinssen, K. Petersen: Atomkernenergie/Kerntechnik 35 (1980) 270
- /13/ Referenzkonzept der Prototypanlage Nukleare Prozeßwärme, Bd. 1, GHT-Ident-Nr. 78.02633 (1981)
- /14/ Krüger, K., W. Dering: Europ. Nucl. Conf. (1979), Hamburg, Transact. S. 104-06
- /15/ Moormann, R., K. Petersen: Jül-1782 (1982)
- /16/ Iniotakis, N., C.B. von der Decken: Specialist meeting on coolant chemistry, plate out and decontamination in gas-cooled reactors (1980), Jülich, Summary Report S. 81
- /17/ Helsby, G.H., M.R. Everett: Dragon Project Report 566 (1968)
- /18/ Burnette, R.D., C.G. Hoot: 18th Bien. Conf. Carbon (1983), San Diego, Ext. Abstr. p. 562-63
- /19/ Finken, R., R. Moormann: Jül-1916 (1984)
- /20/ Rossberg, M., E. Wicke: Chem.-Ing.-Techn. 28 (1956) 181
- /21/ Hinssen, H.-K.: persönliche Mitteilung
- /22/ Loenibßen, K.-J.: persönliche Mitteilung
- /23/ Hilgedieck, R., J. Wahl: Jül-Conf-43 (1981) 77-84
- /24/ Iniotakis, N.: persönliche Mitteilung
- /25/ Iniotakis, N., C.B. von der Decken, K. Röllig, H.J. Schlesinger: Nucl. Eng. Des. 78 (1984) 273
- /26/ Hinssen, H.-K., W. Katscher, R. Moormann: Jül-1875 (1983)
- /27/ Graven, W.M., M.J. Long: J. Am. Chem. Soc. 76 (1954) 2602 u. 6421
- /28/ Moormann, R.: Ber. Buns. Phys. Chem. 87 (1983) 1086-90

- /29/ Moormann, R.: J. Nucl. Sci. Techn. 21 (1984) 824-35
- /30/ Zum Störfallverhalten des HTR-Modul; eine Trendanalyse: Jül-Spez-260 (1984)
- /31/ HTGR Accident Initiation and Progression Analysis: GA-A 13617 (1975)
- /32/ Dietlen, S.: Amts- und Mitteilungsblatt der BAM 10 (1980) 184
- /33/ Hofmann, H., G. Schmidt: Chem.-Ing.-Techn. 56 (1984) 180
- /34/ Sicherheitseinschluß und brennbare Gase im Sicherheitsbehälter einer PNP-Anlage; Ausarbeitung einer Vorlage für das "Beratungsgremium PNP-Sicherheit"; Bergbau-Forschung, GHT, HRB, KFA, Rhein. Braunkohlenwerke; Mai (1979)
- /35/ Loenißen, K.-J., H.-K. Hinssen, W. Katscher, R. Moormann: Jahrestagung Kerntechnik (1985), München, Proc. S. 171-74
- /36/ Zum Störfallverhalten des HTR-500; eine Trendanalyse: Jül-Spez-220 (1983)

8. ABKÜRZUNGEN; SYMBOLE

C_E	= gesamter Graphitabbrand bei Störfallende (kg)
$f(B)$	= Funktion zur Beschreibung der Abbrandabhängigkeit von RG_F
$f(c)$	= enthält den Einfluß von aufgrund veränderlicher Gaszusammensetzung variabler Gastransportparameter auf RG_F
$f(p_{GES})$	= Funktion zur Erfassung der Gesamtdruckabhängigkeit von RG_F
HKV	= hydrierende Kohlevergasung
k_i	= chemische Geschwindigkeitskonstanten; k_1 ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$); k_2, k_3 ($\text{bar}^{-0,5}$)
NWA	= Nachwärmeabfuhr
p_{ED}	= Partialdruck der Eduktgase (bar)
p_{GES}	= Gesamtdruck (bar)
p_{PROD}	= Partialdruck der Produktgase (bar)
RG_F	= auf die geometrische Oberfläche bezogene Graphitabbrandrate ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
RSA	= Reaktorschnellabschaltung
RSg	= Reaktorschutzgebäude
T	= absolute Temperatur (K)
\dot{V}_{NWA}	= NWA-Drucksatz ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
ρ	= Gasdichte ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

I. Core:

- Thermische Leistung
- Brennelement
- Coreaufbau
- Kühlmittel/Durchsatz
- Druck
- He-Eintritts-/Austrittstemperatur
- max. Brennelementtemperatur
- Graphitininventar

II. Primärkreis:

- Bauart
- freies Volumen
- He-Inventar
- Auslegungsdruck des Spannbetondruckbehälter
- Hauptloops
- NWA-Loops

III. Dampferzeuger:

- He-Eintritts/Austrittstemperatur
- Speisewassertemperatur/Massenstrom
- Dampfaustrittstemperatur
- Druck am Wasserdampfaustritt

IV. Reaktorschutzgebäude:

- Bauart
- freies Volumen
- Innendruck

- : 500 MW
- : kugelförmig (60 mm Ø, enthält im 50 mm dicken Innenbereich 13000 TRISO coated particles); graphitische Brennelementmatrix: A3-27 (HOBEG)
- : Brennelementschüttung (65000 Brennelemente, Schüttungsporosität: 39 %; OTTO-Beschickung)
- : He/ 145 kg·s⁻¹
- : 40 bar
- : 300/960°C
- : 1040°C
- : Brennelemente 130 t, Reflektoren 500 t
- : integriert in einen Spannbetondruckbehälter
- : 2200 m³
- : 6800 kg
- : 50 bar
- : 1 Loop zur hydrierenden Kohlevergasung (50 % der Wärmeauskopplung);
- : 2 Loops zur Wasserdampfvergasung von Kohle (je 25 % der Wärmeauskopplung)
- : 4 separate Loops mit He/He-Wärmetauschern; Durchsatz je Loop bei 40 bar: ca. 9,4 kg_{He}·s⁻¹
- : 700/293°C
- : 150°C/55 kg·s⁻¹
- : 540°C
- : 150 bar
- : gasdichter Innenliner, Betonmantel als Schutz gegen Einwirkungen von außen
- : 125000 m³ (Luft)
- : ≈1 bar

Tabelle 1: Hauptauslegungsdaten des PNP-500

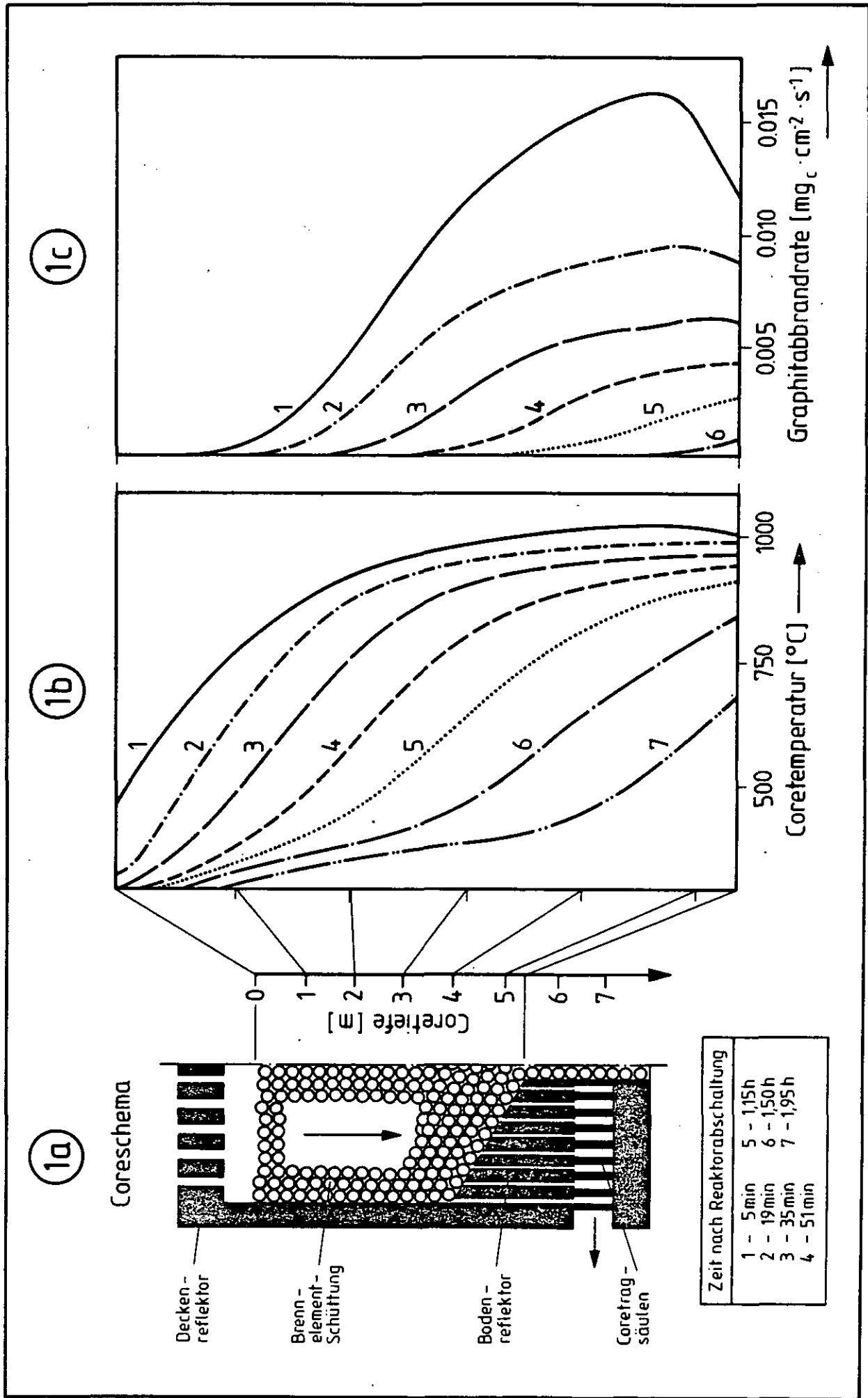


Abb. 1: Coreschema (a), sowie Graphittemperaturen (b) und Korrosionsraten (c) in der Coreachse des PNP-500 bei 5000 kg Wassereintrich und 1 NWA-Loop in Betrieb

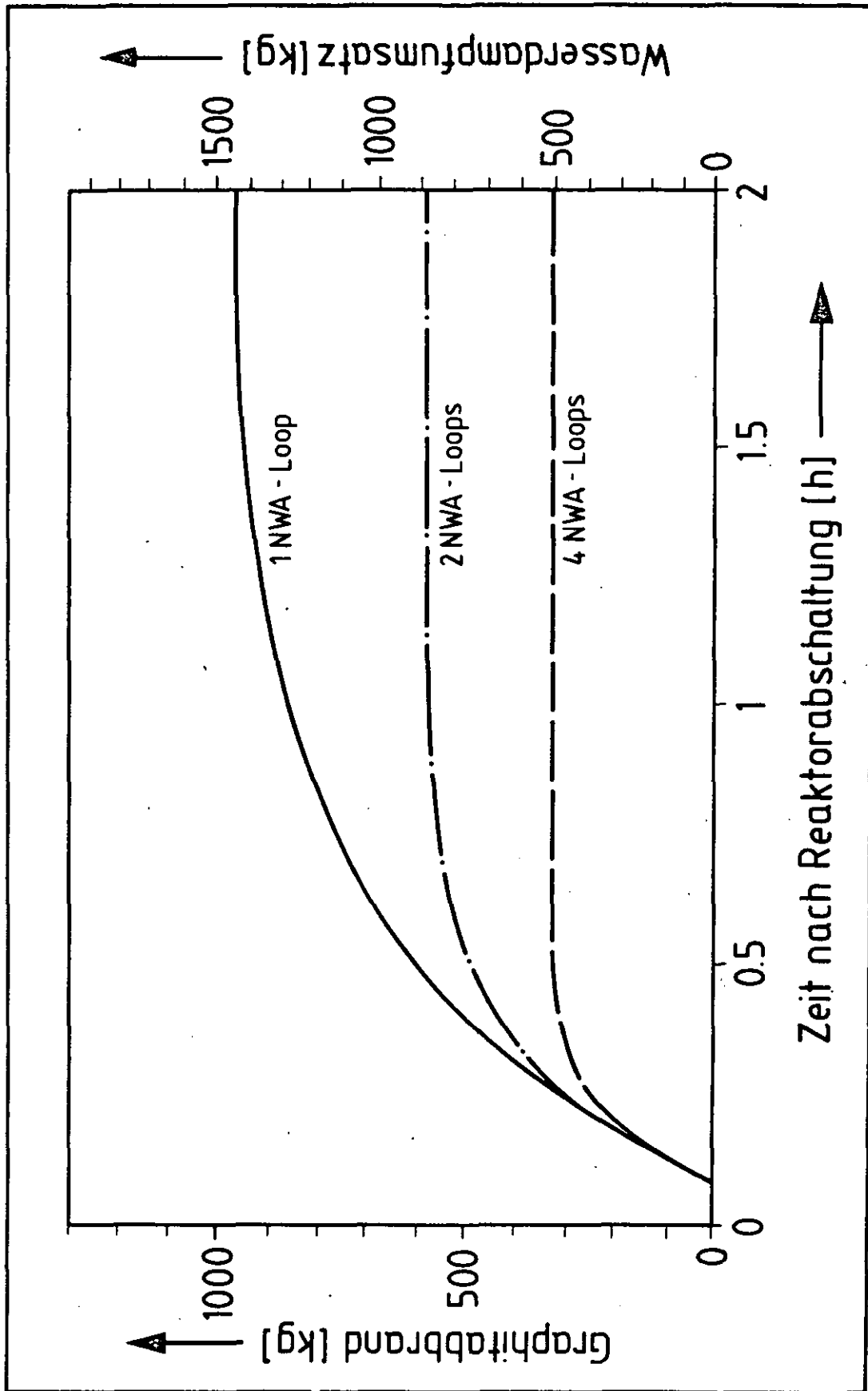


Abb. 2: Gesamter Graphitabbbrand als Funktion der Störfallzeit für verschiedene NWA-Durchsätze (Wassereinbruch: 5000 kg)

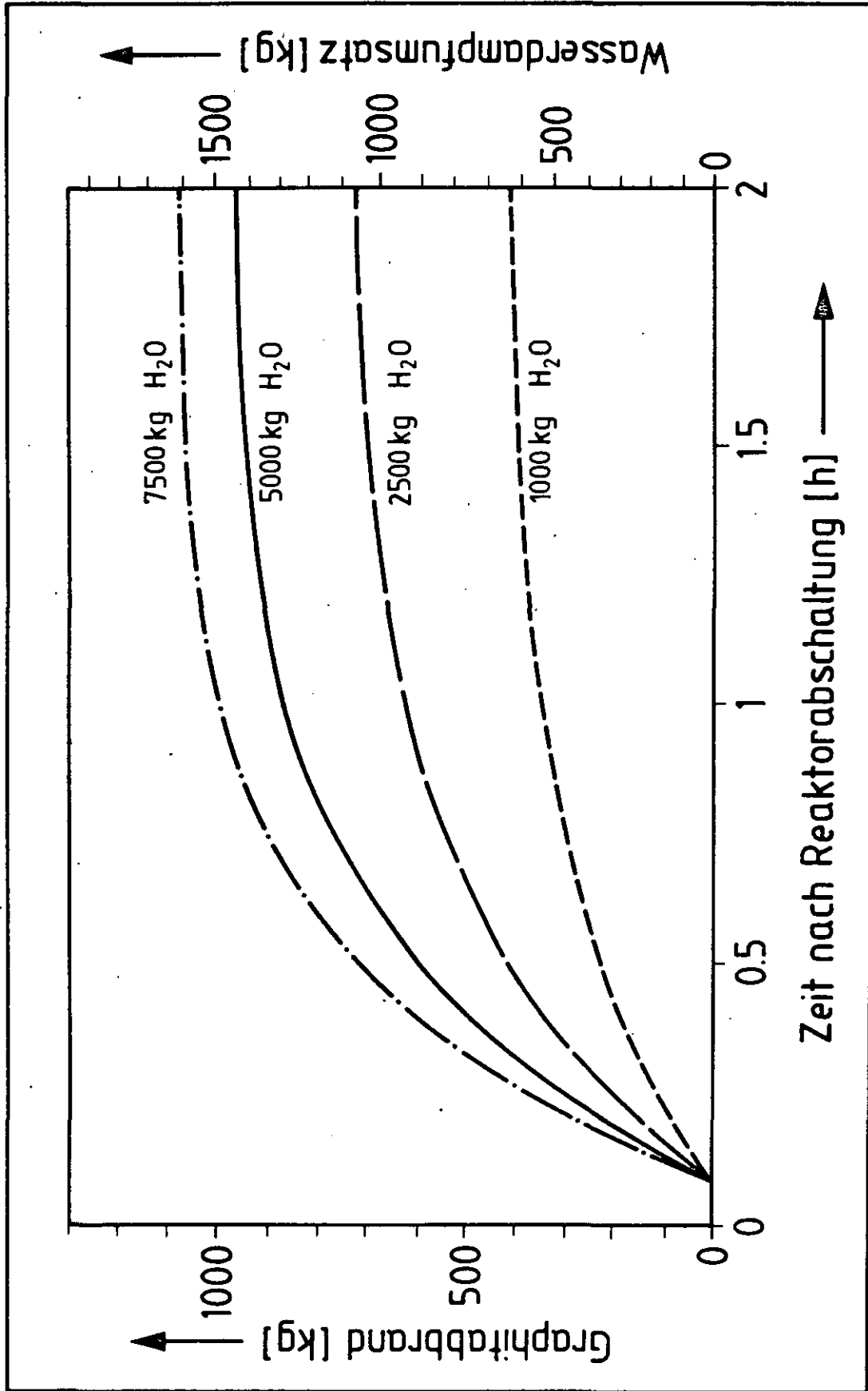


Abb. 3: Gesamter Graphitabbbrand als Funktion der Störfallzeit für unterschiedliche eingebrachte Wassermengen (1 NWA-Loop in Betrieb)

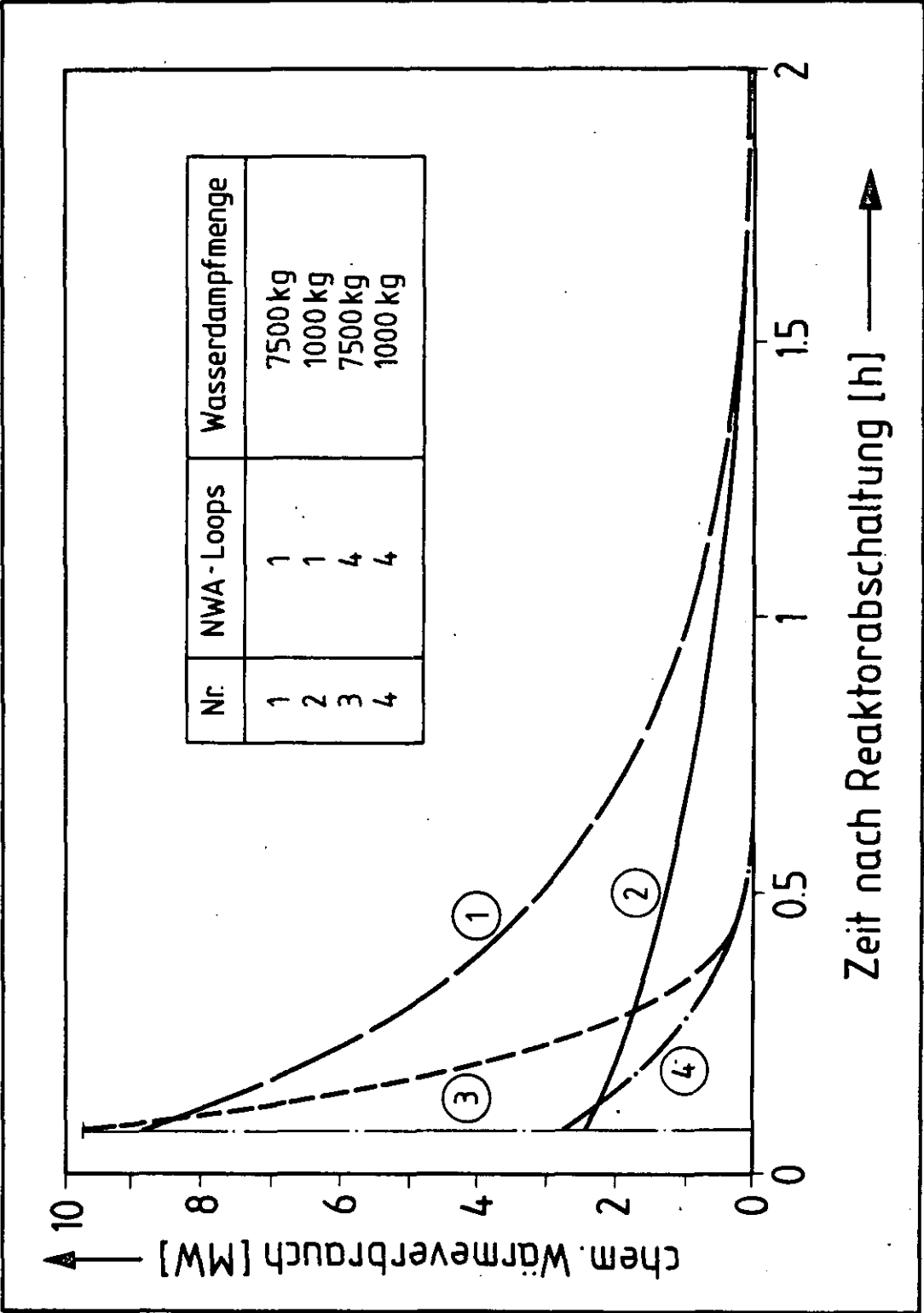


Abb. 4: Zeitabhängiger Wärmeverbrauch durch die chemischen Reaktionen

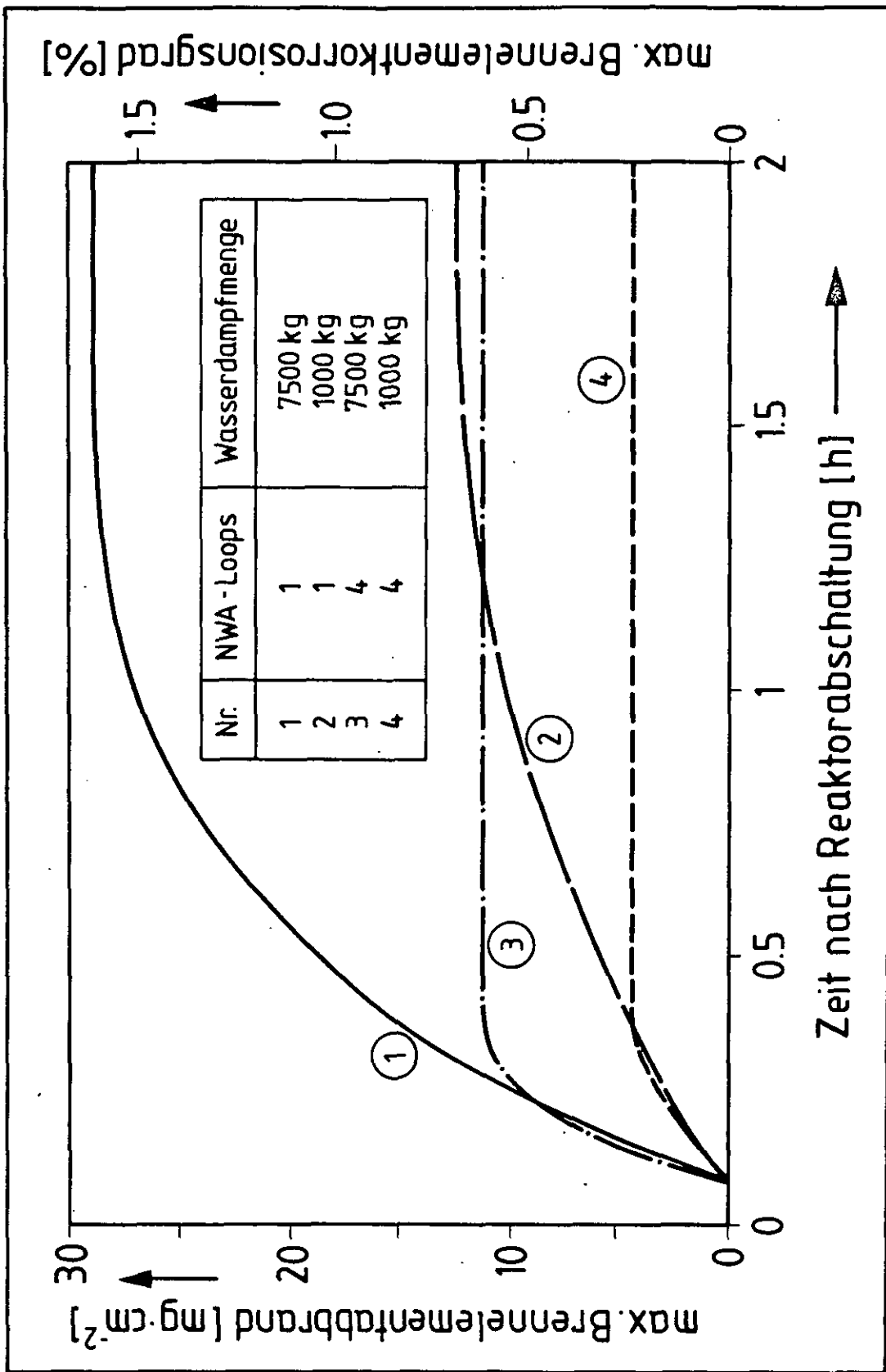


Abb. 5: Zeitabhängiger maximaler Brennelementabbbrand bzw. maximaler Brennelementkorrosionsgrad

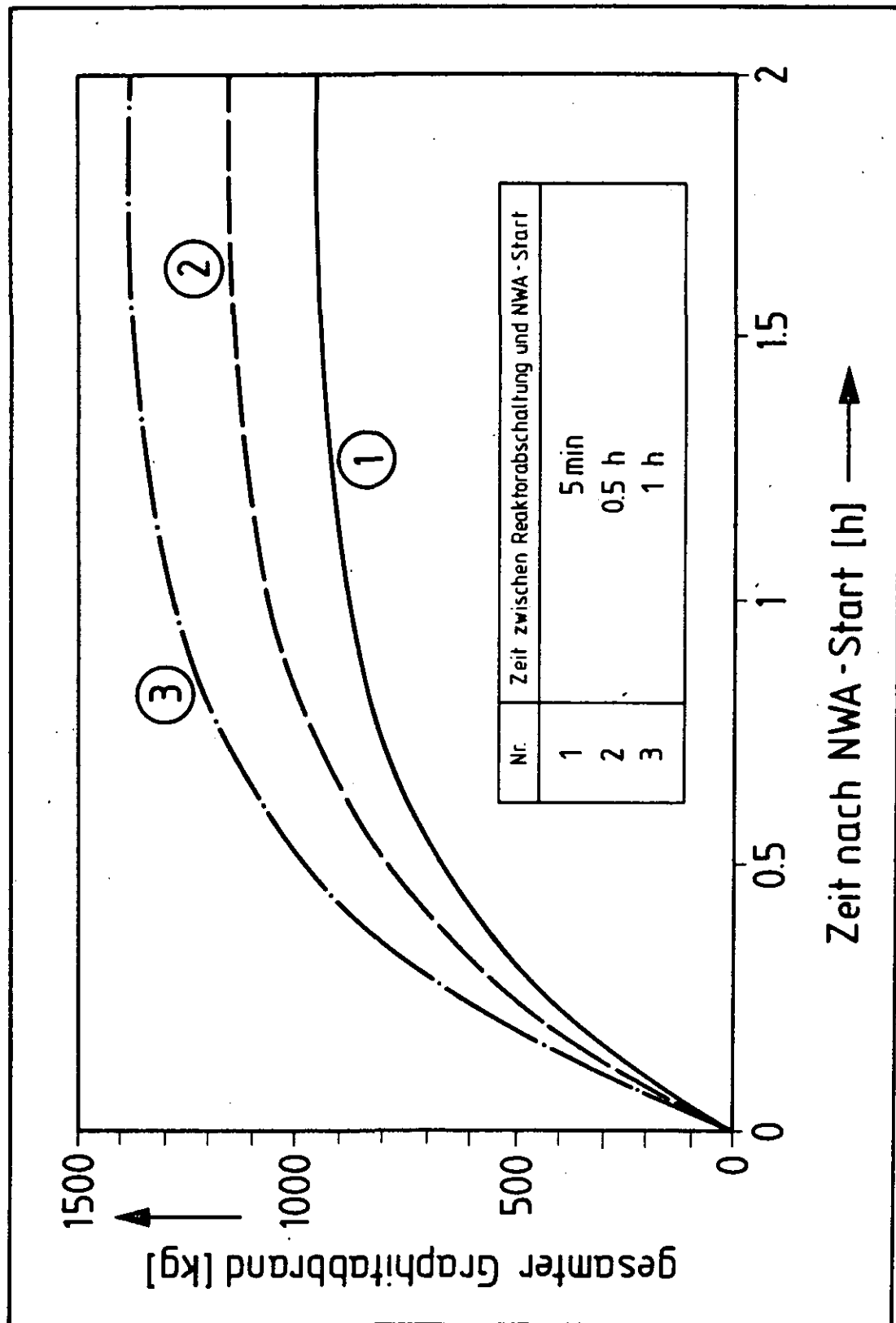


Abb. 6: Gesamter Graphitabbbrand als Funktion der Störfallzeit bei verzögert und unverzögert einsetzender NWA (1 NWA-Loop in Betrieb, Wassereinbruch: 5000 kg)

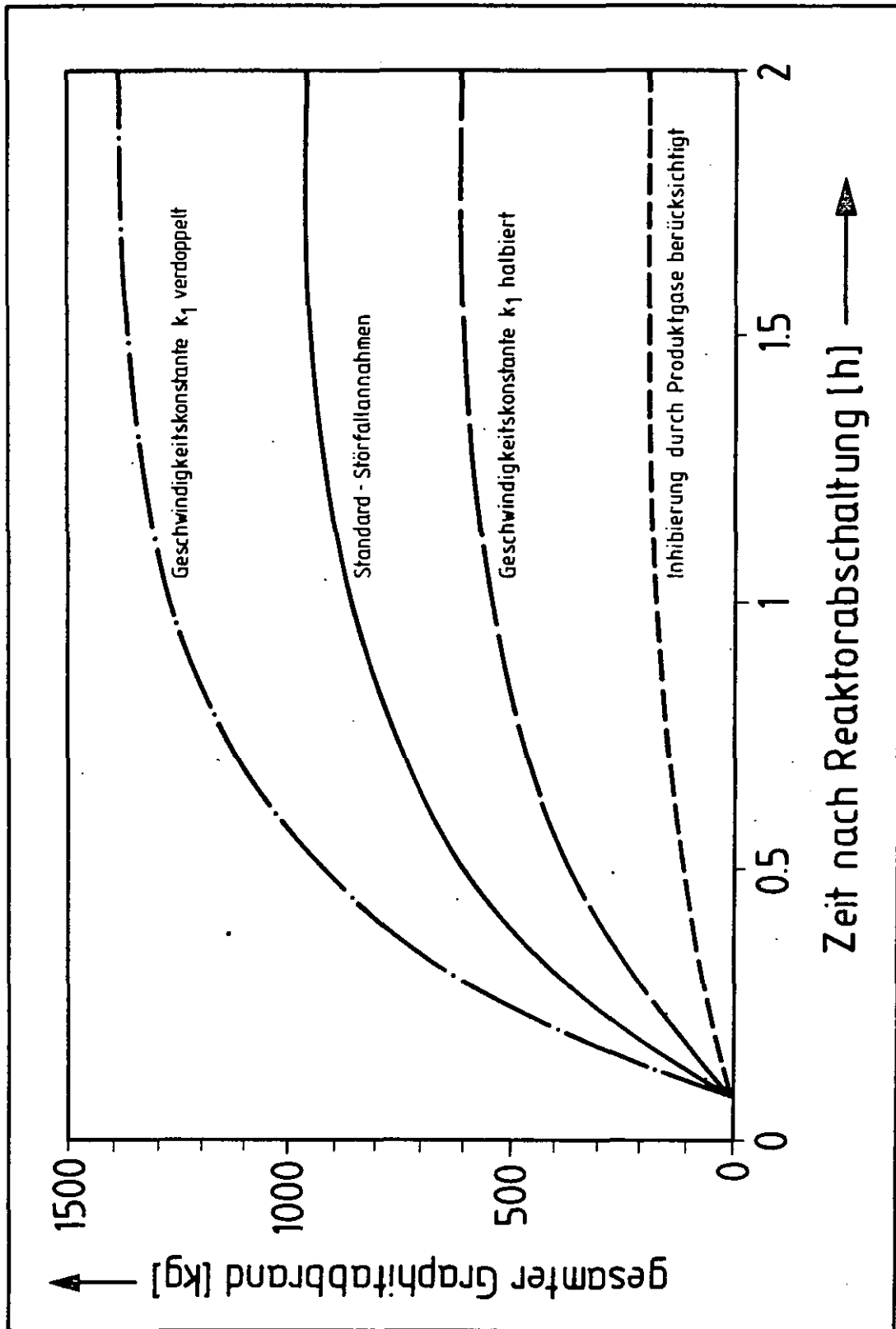


Abb. 7: Zeitabhängiger gesamter Graphitabbrand bei Variation der chemisch-kinetischen Parameter (1 NWA-Loop in Betrieb, Wassereinbruch: 5000 kg)

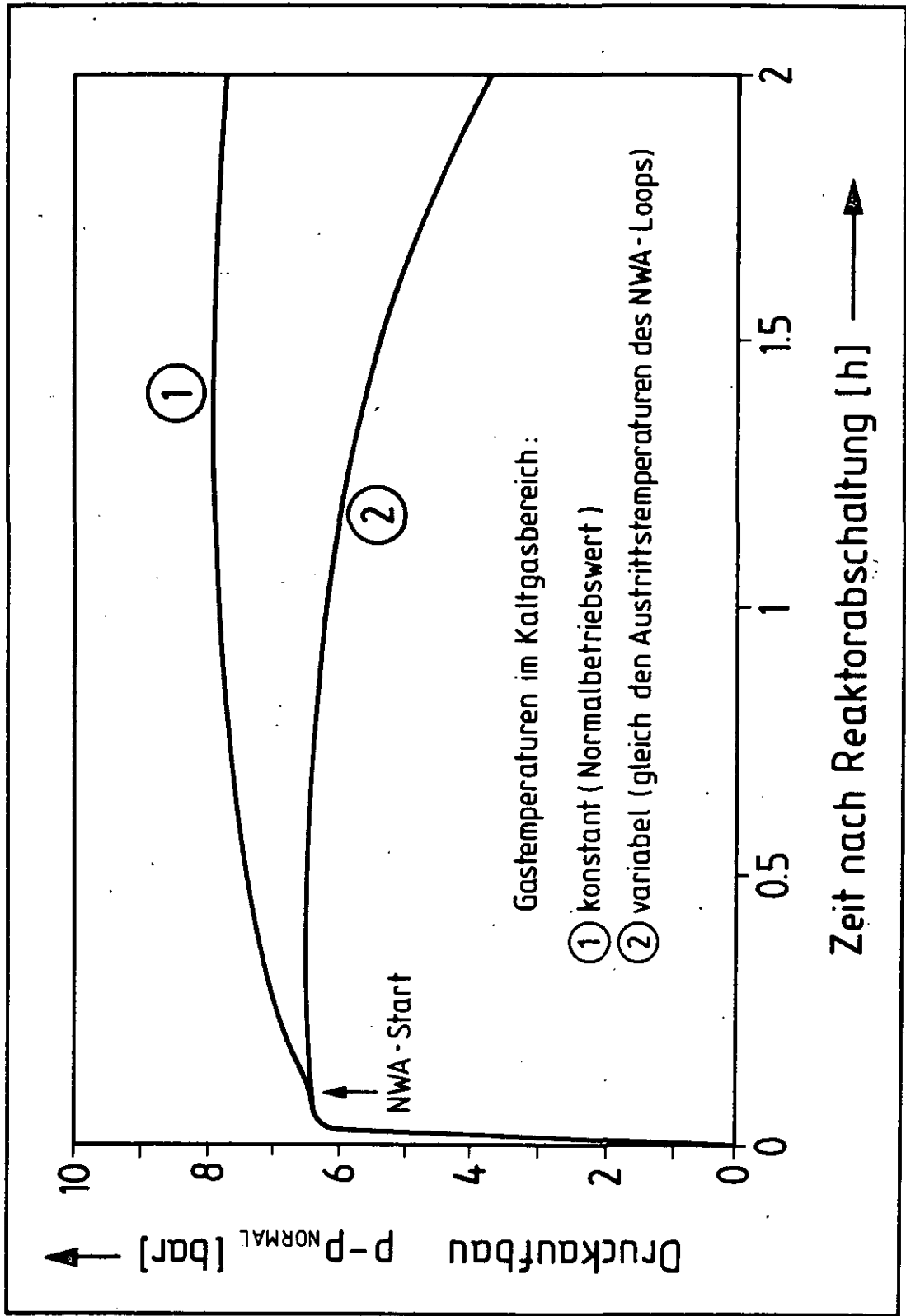


Abb. 8: Transienten des Primärkreisdrucks bei unterschiedlichen Annahmen für die Temperaturen im Kaltgasbereich (1 NWA-Loop in Betrieb, Wassereinbruch: 5000 kg)

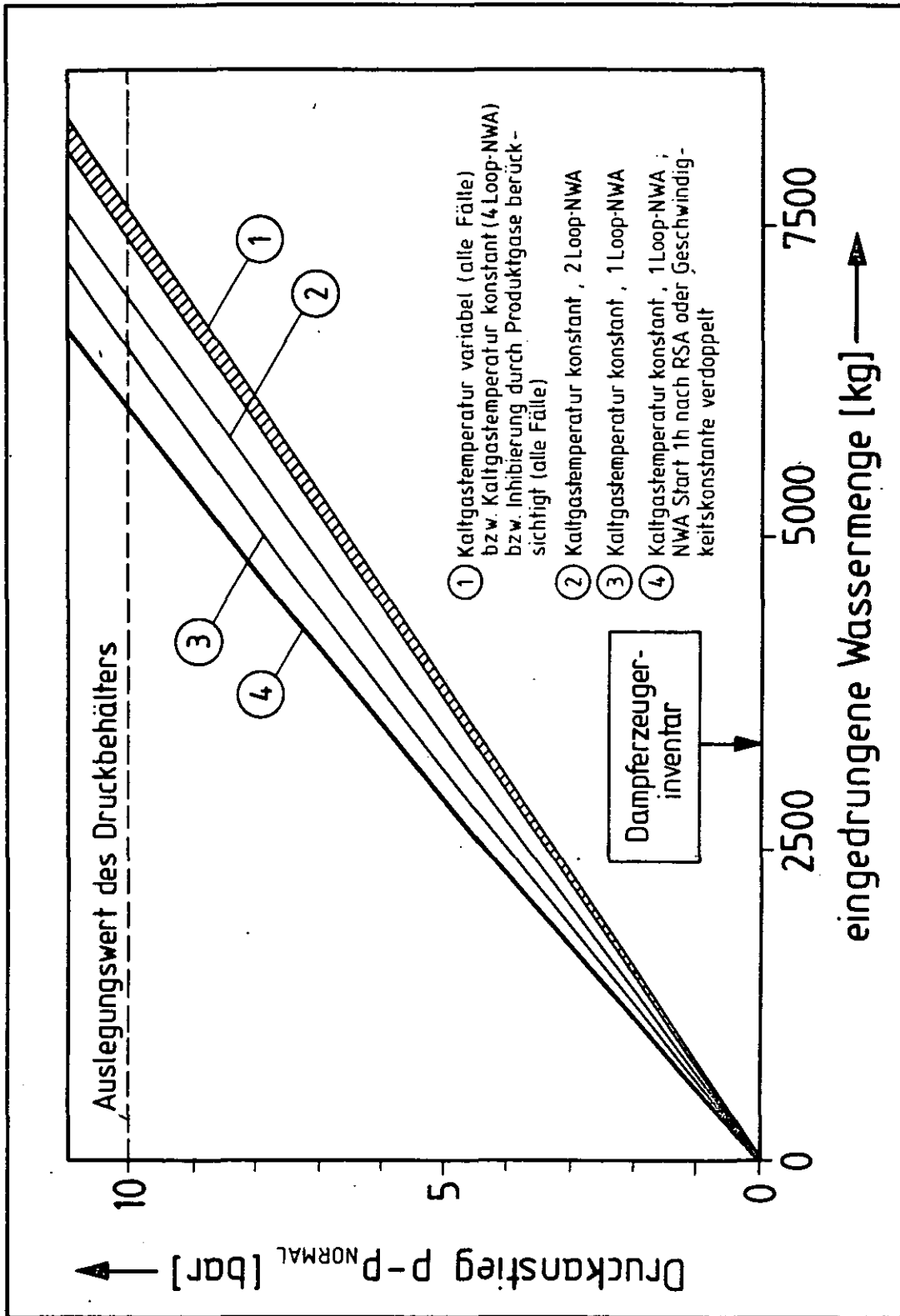


Abb. 9: Maximaler Druckaufbau im Primärkreis in Abhängigkeit von der einbrechenden Wassermenge